Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

Controlador de Flujo Lumínico para Alumbrado Público

P. Nussbaum J. L. Ron D. Segurola G. Casaravilla

Resumen: En este trabajo se describen los principales métodos para controlar el flujo lumínico de una línea de alumbrado en donde las lámparas de descarga y en especial las de sodio de alta presión resultan ser las preferidas debido a una prolongada vida útil y a su alto rendimiento.

Se estudió especialmente la utilización de un equipo regulador en líneas de alumbrado público que permite ajustar la iluminación al tráfico existente sin alterar la uniformidad de esta. Además, al estar las lámparas alimentadas por tensiones no mayores a las nominales se aumenta la vida útil de éstas logrando a su vez ahorro energético.

Se seleccionó una topología basada en el cambio de taps, de la cual se describe su funcionamiento y los mecanismos de protección utilizados.

Palabras de búsqueda: regulador, flujo luminoso, iluminación, llaves electrónicas, cambio de taps, lámparas de descarga, tránsito, ahorro energético.

I. INTRODUCCIÓN

Las lámparas de descarga y en especial las de sodio de alta presión proporcionan luz adecuada para alumbrado público y grandes áreas, tanto interiores como exteriores, con un rendimiento energético bastante más elevado que otros tipos de fuentes de luz [1].

Aún mayores rendimientos se logran racionalizando la utilización de estas fuentes de luz, disminuyendo el flujo luminoso, y por tanto el consumo de energía, cuando las condiciones de uso así lo permitan.

Para la aplicación al alumbrado público es esencial que el regulador sea compatible con las instalaciones existentes ya que debido a su extensión, cualquier modificación de las mismas aumentaría considerablemente la inversión inicial y el tiempo de instalación.

II. MÉTODOS DE REGULACIÓN

La condición de compatibilidad con las instalaciones existentes elimina los métodos de control de flujo basados en la utilización de doble balasto o doble condensador que además sólo permiten obtener dos niveles de iluminación. Además de esto, con la utilización de un control continuo es posible obtener ahorros energéticos mayores.

Con la restricción antes mencionada, los métodos de regulación son básicamente:

A. Control de fase
B. Choppeo de corriente
C. Cambio de taps
D. Transformador con escobillas

La aplicación del regulador en alumbrado público impone otra limitación. Mientras se registra el máximo tráfico las lámparas deben trabajar a voltaje nominal (220V) para satisfacer las necesidades de iluminación. Esto suele coincidir con las horas de mayor demanda a las redes de distribución y por lo tanto la tensión suele ser menor que la nominal.

El equipo regulador debe entonces poder suministrar a las lámparas un voltaje mayor al de entrada.

En las siguientes figuras, a modo de ejemplo, se muestra la curva típica de la densidad horaria de tránsito Fig. 1 y una curva de carga de una estación de distribución con diversidad de clientes Fig. 2.

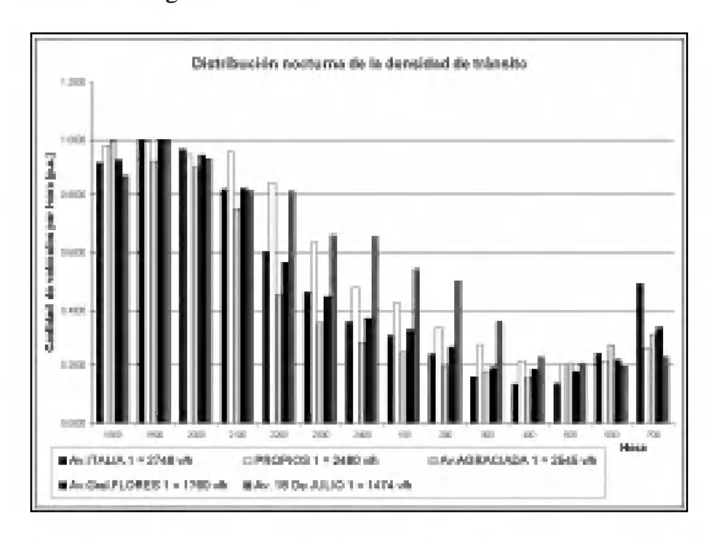


Fig. 1. Distribución nocturna de la densidad de tráfico en 5 importantes vías de Montevideo.

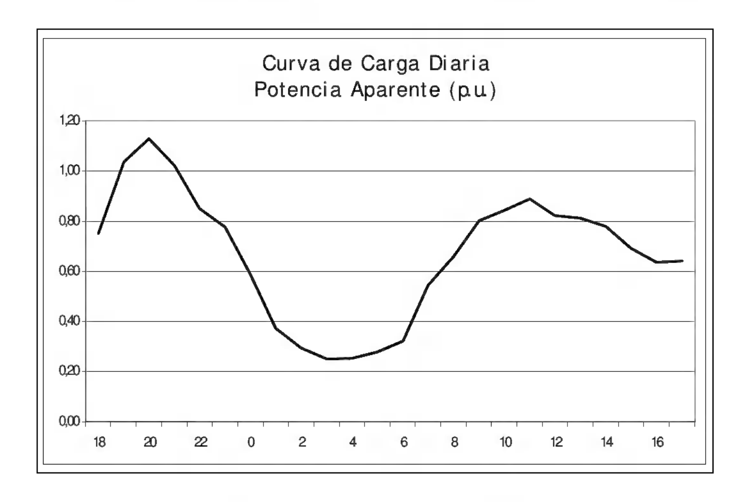


Fig. 2. Curva de carga diaria de una estación de distribución con diversidad de clientes.

0-7803-9938-2/99/$10.00

A. Control de fase: Es un método muy conocido de obtener un voltaje de ac variable a partir de una fuente fija de ac (Fig. 3.a).
Si bien es muy sencillo y económico ya que sólo utiliza dos llaves no apagables su principal desventaja consiste en la introducción de armónicos de voltaje y corriente.
Además el propio método de control, retardo del ángulo de disparo, provoca un deterioro del factor de potencia de entrada.
El alto contenido armónico introducido puede excitar modos normales de oscilación mecánica en las lámparas que son muy perjudiciales para su vida útil.

2. Con transformador booster: La tensión variable obtenida se aplica a un transformador en serie con la línea (Fig. 3.d).
La ventaja fundamental de esta configuración es que la corriente por las llaves es inversamente proporcional a la relación de transformación del booster y por tanto puede ser bastante menor que la corriente de carga.
Esto permite usar llaves de menor corriente nominal y por lo tanto más económicas y menos voluminosas a costa de incluir un transformador booster por fase.

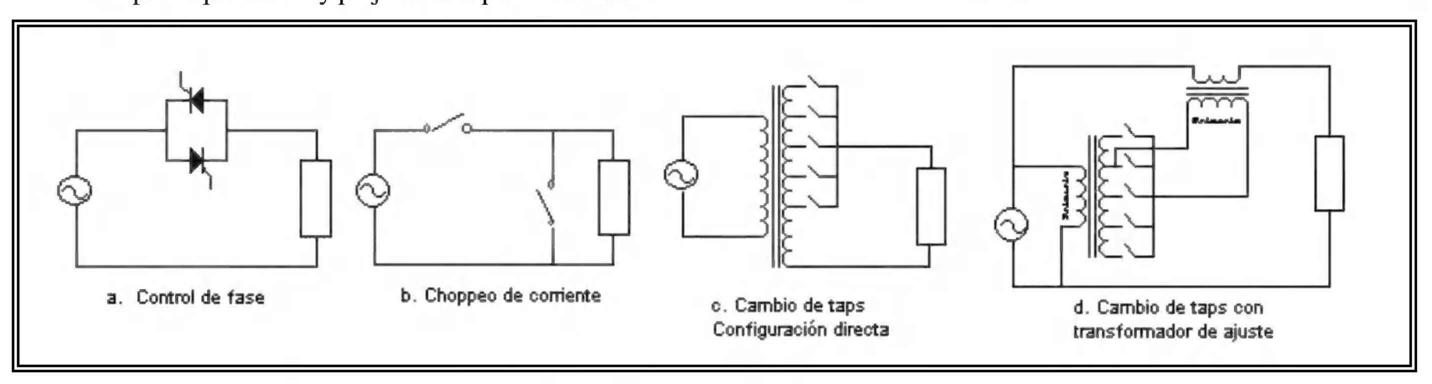


Fig. 3. Configuraciones básicas de reguladores de tensión.

B. Choppeo de corriente: Los diferentes métodos de choppeo de ac reducen significativamente este problema ya que los armónicos no eliminados son de alta frecuencia y por esto de más fácil filtrado. Existen métodos que además de eliminar armónicos permiten la corrección del factor de potencia [2].
Es una gran alternativa para la regulación de voltaje pero las llaves bidireccionales apagables necesarias para operar en alta frecuencia son mucho más costosas que las llaves no apagables, en especial para manejar potencias elevadas. Su empleo se justifica cuando el peso y el tamaño son muy críticos. Un esquema básico se muestra en la Fig. 3.b.
Las llaves apagables operan en forma complementaria; la llave en paralelo con la carga provee un camino a las corrientes inductivas cuando se corta la otra.

C. Cambio de taps: Se disponen llaves en las derivaciones de un transformador o autotransformador. La tensión de salida dependerá de cuál de estas llaves está en conducción. En esta configuración no se producen armónicos de tensión o corriente.
Es posible encontrar dos formas básicas:

1. Directa: (Fig. 3.c) La tensión de salida se toma entre dos derivaciones del transformador. Por las llaves circulará toda la corriente de carga.

D. Transformador con escobillas: Consiste en un transformador especial donde unas escobillas se hacen deslizar mediante un servomotor sobre las espiras del secundario para de esa forma variar la tensión.
Esta opción se descarta por presentar serias desventajas. Sus partes móviles requieren frecuente mantenimiento y en su construcción se requiere mano de obra más experiente y materiales especiales de alta resistencia al desgaste.

De acuerdo a la exposición anterior se decidió construir el prototipo que realiza cambio de taps con transformador booster.

III. RESPUESTA VISUAL

Se compararon recomendaciones de diversas fuentes acerca de la iluminación necesaria para vías de tránsito en función del tráfico registrado [3].

Asumiendo que el flujo nominal de la instalación satisface los requerimientos visuales del tránsito máximo, los resultados de esta comparación muestran que es posible una reducción del flujo lumínico de hasta el 50 % en las horas de menor tránsito.

En cuanto al nivel de iluminación, variaciones del orden del 10 % son prácticamente imperceptibles y del 15 % tolerables [4].

IV. ESPECIFICACIONES

El equipo alimenta una línea de lámparas de hasta 20 kW en una red trifásica de 380 V con neutro, donde se admitirá variaciones de ± 10 % con respecto a estos valores nominales.

El nivel de iluminación se podrá fijar entre el 50 % y el 100 % del flujo nominal con una precisión de 7,5 % del valor deseado.

De esta forma la diferencia entre el flujo deseado y el obtenido no es perceptible y en el momento cambiar el tap habrá variaciones máximas del 15%, que son tolerables [4].

El prototipo construido es monofásico.

Como prestación adicional, desde una computadora central se puede controlar en forma remota algunos parámetros de este equipo regulador como, por ejemplo, horas de encendido y apagado, niveles de iluminación, así como recoger los valores de tensión, potencia, etc. Estos valores se pueden utilizar para, por ejemplo, determinar el momento en que se debe efectuar la reposición de las lámparas, ver el ahorro energético o para controlar la calidad de tensión suministrada por la empresa eléctrica.

V. CARACTERÍSTICAS DE LA REGULACIÓN

Se realizaron ensayos de lámparas de sodio de alta presión de Vnom=220 V, para determinar la relación entre el flujo luminoso y el voltaje de alimentación.

En el intervalo entre el 50 % y el 100 % del flujo luminoso nominal, la relación con el voltaje de alimentación es aproximadamente lineal obteniéndose:

Lámparas de 70 W

$$\text{Flujo}(\%) = 3{,}035 * \text{Voltaje}(\%) - 203{,}5 \quad (1)$$

Lámparas de mayor potencia

$$\text{Flujo}(\%) = 2{,}322 * \text{Voltaje}(\%) - 132{,}2 \quad (2)$$

Para llevar el flujo al 50 % del nominal, la tensión sobre las lámparas debe ser:

$V = 83{,}5\ \%\ V_{nom} \cong 183{,}8\ V$
para lámparas de 70 W

$V = 78{,}4\ \%\ V_{nom} \cong 172{,}6\ V$
para lámparas de mayor potencia

Se desprende de (1) y (2) que para mantener el flujo en el nivel deseado con una precisión del 7,5 %, la tensión debe ser regulada al:

$$\Delta V(\%) = \pm 7{,}5\ \% / 3{,}035 \cong \pm 2{,}5\ \% \quad (3)$$

para lámparas de 70 W

$$\Delta V(\%) = \pm 7{,}5\ \% / 2{,}322 \cong \pm 3{,}2\ \% \quad (4)$$

para lámparas mayores

A los efectos de lograr que el regulador sea independiente de la potencia de las lámparas instaladas es necesario que se pueda lograr a la salida una tensión $V_{mín} \cong 172$ V y que la regulación de voltaje se realice al ±2,5 %.

De los ensayos también se desprende que la tensión mínima de arranque es aprox. 180 V (que concuerda con los datos recabados de diferentes fabricantes).

Uno de los ensayos realizados consistió en encender una lámpara a tensión nominal y luego de esperar el tiempo de calentamiento reducir paulatinamente la tensión de alimentación. Con valores de tensión inferiores a 100 V (45 % de la nominal) no se produjo la extinción del arco demostrando que en las condiciones de funcionamiento del equipo, las lámparas no se apagarán por baja tensión.

VI. DISEÑO

A. Cantidad de derivaciones

Una vez determinada la topología del regulador, se determina la cantidad de derivaciones necesarias.

Sea Vsec, la tensión en el secundario del booster que se agrega al voltaje de red para obtener en las lámparas el voltaje deseado.

Estudio del peor caso:

1. Voltaje requerido = 220 V (100 % flujo)
   Voltaje de la red = 198 V (mínima)
   Voltaje a agregar = 220 V – 198 V = 22 V

   Vsec(198) = 22 V   Vsec(220)= 24,4 V

2. Voltaje requerido = 172 V
   Voltaje de la red = 242 V
   Voltaje a agregar = -70 V

   Vsec(242)= -70 V   Vsec(220)= -63,6 V

El voltaje se regula al ± 2,5 % por lo tanto al cambiar de un tap al consecutivo la variación podrá ser como máximo el doble de este valor. La cantidad de taps necesaria para cubrir toda la posible variación del voltaje de red y lograr todo el rango de tensiones necesario en la salida está dada por el entero n que satisface:

$$(1 + 2 * 0{,}025)^n \geq \frac{220 + 24{,}4}{220 - 63{,}6} = 1{,}56 \quad (5)$$

Se necesitan al menos 10 derivaciones en el transformador de ajuste. El prototipo se construyó con 12 derivaciones para tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Por razones constructivas el voltaje en las derivaciones está cuantizado (de acuerdo a la cantidad de vueltas de sus bobinas).

2. La caída de tensión en sus devanados introduce errores que dependen de la carga.
3. Es necesario que los intervalos se solapen (histéresis) para evitar exceso de conmutaciones cuando el voltaje está cerca de la frontera.

B. Transformador Booster.

Sea Kb la relación de transformación del booster, la corriente por las llaves es Kb veces menos que la corriente de carga por lo que es conveniente tomar Kb lo más grande posible.

Por otro lado consideremos la eventualidad de que todas las llaves estén abiertas y el regulador con su carga nominal.

En este caso la mayor parte del voltaje de red caerá en el secundario del booster y aparecerá multiplicado por Kb sobre las llaves.

La elección de Kb estará entonces limitada por la capacidad de conducción de corriente y por el voltaje que soportan las llaves de tap.

La potencia del transformador con derivaciones y del booster es la misma ya que el secundario del primero alimenta el primario del segundo.

Se toma para la potencia del booster el máximo del producto V*I en sus devanados para todas las condiciones de funcionamiento. Este máximo se da cuando la tensión de red es 10 % mayor que la nominal y se debe entregar a la salida la tensión mínima (172 V). La corriente en este caso es la que consumen las lámparas cuando entregan el 50 % del flujo luminoso nominal.

C. Manejo de llaves

Las llaves de taps se implementarán con contactores, por lo que, cuando se le quita el disparo recién se apagarán cuando la corriente, impuesta por la carga, pase por cero.

Cuando el sistema de control ordena un cambio de tap, es posible que, durante cortos períodos, dos llaves conduzcan simultáneamente o no haya ninguna en conducción.

En el primer caso habrá cortocircuitos entre derivaciones adyacentes del transformador de ajuste y en el segundo el primario del booster quedará en vacío provocando una importante caída de la tensión sobre las lámparas.

Una opción de diseño puede ser asegurar que siempre haya al menos una llave en conducción para evitar la caída de tensión. Esto requiere colocar resistencias en serie con cada derivación a efectos de limitar la corriente de cortocircuito. La desventaja de esta opción es que estas resistencias permanecen en el circuito luego de efectuado el cambio de tap provocando pérdidas.

Otra opción sería no encender una llave hasta que se corte la que conducía. Esto elimina los cortocircuitos pero al quedar el primario del booster en vacío, la tensión de red cae mayoritariamente en su secundario. Esta opción puede ser válida para otro tipo de cargas pero no para las lámparas de descarga ya que si éstas se apagan luego no pueden re-encender hasta que se hayan enfriado.

Para el diseño del prototipo se decidió por otra opción más elaborada que consiste en colocar otra llave, denominada llave conmutadora (se abreviará L.C.), que conducirá sólo durante un cambio de tap (Fig. 4).

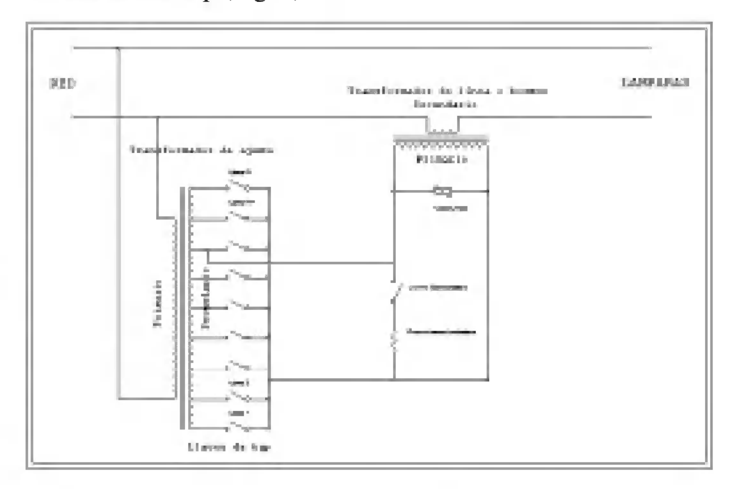


Fig. 4. Configuración elegida con transformador booster y llave conmutadora.

La secuencia de eventos cuando se hace un cambio de tap es la siguiente:

1. Se desenergiza la bobina del contactor en conducción.
2. Cuando el contactor abre se producen sobretensiones que son detectadas antes que haya poca tensión para mantener encendidas las lámparas y dispara la llave conmutadora que conducirá inmediatamente.
3. Con la L.C. en conducción el voltaje a la salida es aproximadamente el de la red impidiendo el apagado de las lámparas. Mientras conduce la llave conmutadora se dispara la llave que debe tomar la conducción.
4. Esta llave al cerrar quedará en cortocircuito con L.C. Este cortocircuito se limitará con una resistencia en serie con L.C.
5. La llave conmutadora, implementada con SCRs en antiparalelo se apagará cuando la corriente pase por cero ya sea en forma natural o porque el circuito externo le impone un voltaje inverso.

De esta forma se evitan los cortocircuitos entre derivaciones, sólo habrá cortocircuitos con la L.C. y por tanto sólo es necesaria una resistencia limitadora que además queda fuera del circuito en funcionamiento normal.

Esta resistencia limitadora deberá ser suficientemente grande como para limitar el cortocircuito a valores admisibles para la llave y suficientemente pequeña para que no introduzca importantes caídas de tensión.

La potencia de la misma no es un parámetro de diseño importante ya que su funcionamiento será pulsado. La usada en el prototipo es de 10 W; para conducción continua debería diseñarse para disipar aproximadamente 600 W.

Las protecciones deberán asegurar que efectivamente la L.C. funcione en forma pulsada.

D. Protecciones

Las fallas de las que hay que proteger al equipo pueden ser de origen externo o interno al mismo.

En la Fig. 5, un esquema en bloques del regulador muestra las protecciones utilizadas.

Fallas internas:

1. Cortocircuito en los transformadores.

   Un cortocircuito en los transformadores será detectado por una protección termomagnética a la entrada del regulador.

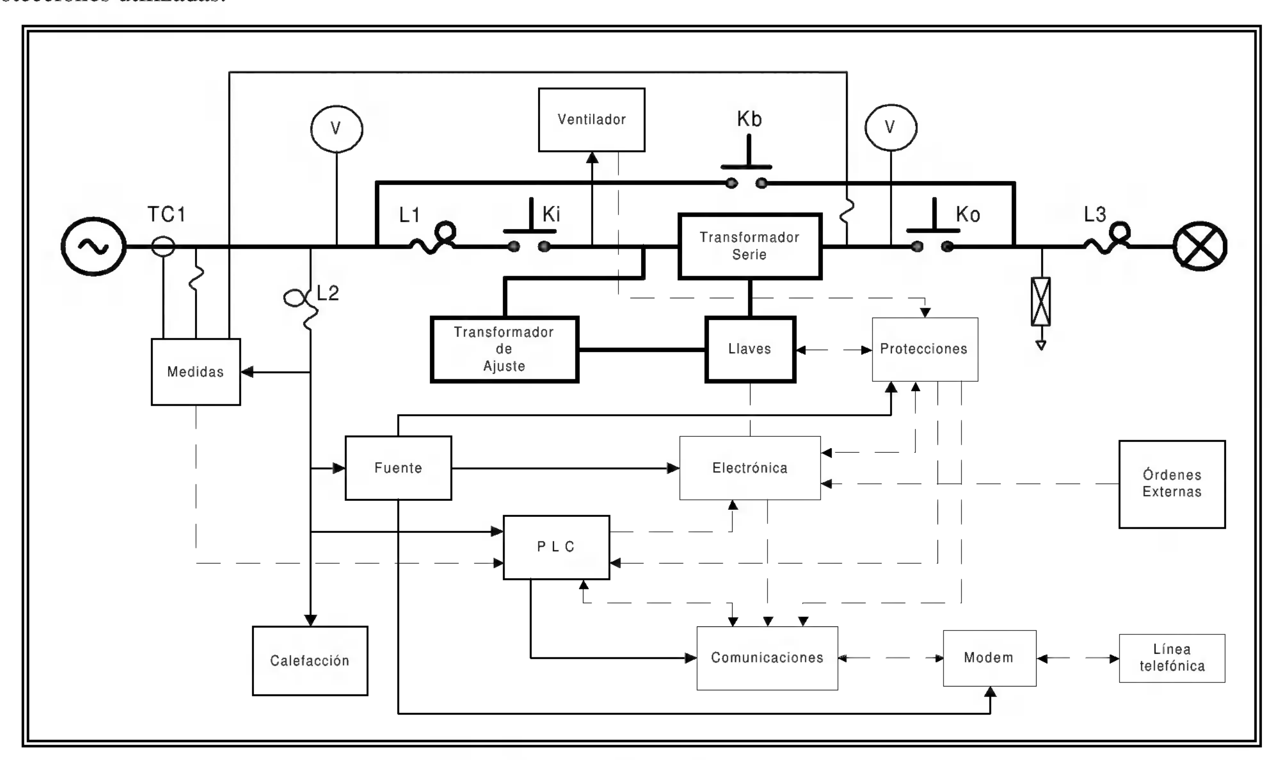


Fig. 5. Esquema en bloques del regulador.

Fallas externas:

1. Cortocircuito a la salida.

   Una llave termomagnética colocada en bornes de salida del regulador protege al equipo de cortocircuitos en la línea de lámparas. Mientras esta protección no actúa la llave conmutadora puede verse sometida a pulsos de alta corriente que serán limitados por un varistor que se coloca en el primario del booster.

2. Sobrecarga del regulador.

   La corriente nominal por las llaves de tap es 11 A y se utilizaron contactores de 9 A con sus tres polos en paralelo. Esto proporciona un margen de sobrecarga elevado. La llave conmutadora aunque actúa en forma pulsada también fue sobredimensionada. Para proteger los transformadores se detecta la sobrecarga prolongada y se genera una alarma que cierra el contactor de bypass Kb.

3. Transitorios de alta tensión.

   Los transitorios de alta tensión son particularmente perjudiciales para las llaves electrónicas. Son producidos, entre otras causas, por descargas atmosféricas y conmutaciones en circuitos de potencia. Aunque en el primario del booster se coloca un varistor para evitar sobretensiones en las llaves, es conveniente la instalación de otro varistor directamente en bornes de salida del regulador como protección primaria.

2. Cortocircuito en la fuente de alimentación de los circuitos de control.

   También cuenta con protección termomagnética la fuente de alimentación, el circuito de comunicación, el PLC, el módem y la resistencia calefactora del gabinete.

3. Fallas en las llaves.

   En general se trataron las situaciones críticas de la siguiente forma, primero actúan protecciones electrónicas para despejar la falta o impedir el apagado de las lámparas y luego actúan las lentas protecciones mecánicas.

   a. No cierra una llave de tap: en este caso el primario del booster queda en vacío produciéndose sobretensiones que dispararán la llave conmutadora. Esto impide el apagado de las lámparas pero al estar la L.C. diseñada para actuación pulsada se genera una alarma y se cierra el contactor de bypass para protegerla.
   b. No abre una llave de tap: las llaves se protegen contra sobrecorriente para reducir la probabilidad que ocurra esta falla, de todas maneras, al disparar la siguiente llave de tap se produce un cortocircuito que dispara L1 (ver Fig. 5). Esto genera una alarma que dispara el contactor de bypass Kb para mantener el servicio.
   c. Llave conmutadora quemada en abierto: la tensión sobre la L.C. se compara con dos niveles. El primero genera el disparo de ésta pero si falla en abierto la

tensión continuará subiendo hasta alcanzar el segundo nivel. Esto genera una señal de alarma y provoca el disparo del contactor de bypass Kb.

d. Llave conmutadora quemada en cortocircuito: Se detecta sensando la tensión sobre la resistencia limitadora; estará fallada en cortocircuito si continúa en conducción después de finalizado el cambio de tap. En esta situación se encuentran la L.C. y la llave de tap que está disparada en cortocircuito por lo que se suprimen todos los disparos.
Una vez despejado el cortocircuito se cierra el contactor de bypass ya que cualquier otro cambio de tap provoca cortocircuitos con L.C.

Se controla permanentemente la temperatura de los transformadores ya que una aumento excesivo de la misma es clara indicación de sobrecarga o mal funcionamiento. El interior del gabinete se refrigera por circulación forzada de aire; vigilándose la velocidad de la turbina mediante una barrera óptica.

VII. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta algunas particularidades de las lámparas de descarga y su aplicación para iluminación de tráfico vehicular es posible construir un equipo de diseño sencillo y eficiente. La topología y la estrategia de control deberán estar adaptadas a la sensibilidad del usuario y a las características de las lámparas de descarga.

Actualmente el prototipo se encuentra bajo pruebas de campo, obteniéndose hasta el momento buenos resultados.

VIII. REFERENCIAS

[1] PHILIPS, “Manual de Alumbrado”, p.23.4, 1976.

[2] D.Hyun, G.Choe, M.Eshani, “Asymmetrical PWM Technique with Harmonic Elimination and Power Factor Control in AC Choppers,” IEEE Trans. Power Electron.,vol. 10, No 2, pp. 175-184, March 1995.

[3] IMM, Generalitat de Catalunya, Manual de Alumbrado (OSRAM) y Norma DIN 50.44.

[4] Illuminating Engineering Society of North America, “Lighting Handbook”, 8^{th} edition, p. 416.

IX. BIOGRAFÍAS



Patrick Nussbaum es estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República Oriental del Uruguay.



José Luis Ron es estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República Oriental del Uruguay.



Dardo Segurola es estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República Oriental del Uruguay.



Gonzalo M. Casaravilla (S'89-M'91) recibió en 1990 el título de Ingeniero Electricista de la Universidad de la República. Desde 1996 se desempeña como docente del Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica y es actualmente Profesor Adjunto siendo su campo de especialidad la Electrónica de Potencia.